

## Reliability evaluation of power grid including Aqua Buoy

Milad Barzin, *MSc*

Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran

miladbarzin1371@gmail.com

Received: 30 April 2024

Revised: 09 June 2024

Accepted: 15 June 2024

### Abstract:

In recent years, ocean energy has been used as a renewable energy source that has various types such as wave energy, tidal energy and ocean thermal energy to produce electrical energy in many countries. Among the reasons for this are the sudden increase in oil prices at the end of the 1970s, environmental problems caused by fossil fuels such as climate change and global warming, and efforts to achieve sustainable and inexhaustible energy sources. Due to the high density of wave energy, various technologies have been developed in the world to convert this energy into electrical energy. Unfortunately, the growth of wave energy converters has been less compared to other renewable energy sources such as wind turbines and photovoltaic systems, and this is due to the high cost of generating electricity by these converters. Studies that have been conducted so far in the field of wave energy have focused more on the principles of operation of these technologies and their cost, and other aspects of these converters have not been considered. On the other hand, reliability in today's power grids has become one of the most important factors, and one of the demands of consumers of electrical energy from electricity producers and distributors is that the electricity provided to them should have the least uncertainty while meeting the necessary standards in the field of power quality. Accordingly, this paper has been defined in order to fill the gap created in the field of studying the reliability of wave energy converter based on Buoy technology. In the first stage, it is necessary to develop a reliability model for these converters by understanding the principles of operation, components and their power generation relationships in terms of important wave parameters, including wave height and wave period, which are effective in determining the amount of wave energy. In developing this model, both the failure of the constituent elements and the changes in the output power of these power plants, which are caused by large changes in wave height and wave period, must be taken into account. In the following, the technique for studying the reliability of the power system with the presence of these power plants is introduced and the important reliability indices of the power system with the presence of these power plants are calculated. In order to examine the proposed method, the reliability models obtained for these converters are used in the reliability assessment of the RBTS and IEEE-RTS standard test systems, and the effect of these power plants on improving the reliability indices of the power system is examined and the superior technologies in terms of improving the reliability indices of the power network are determined.

**Keywords:** Reliability, wave power plant, Aqua Buoy, analytical approach.

**Corresponding Author:** Milad Barzin

**Corresponding Author Address:** Department of Electrical Engineering- Kazeroon Branch -Islamic Azad University- Kazeroon, Iran

## ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های امواج بایو

میلاذ برزین

دانشکده مهندسی برق - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران  
miladbarzin1371@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

**چکیده:** در سال‌های اخیر انرژی اقیانوس به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر که دارای انواع مختلفی به مانند انرژی امواج، جزرومد و انرژی حرارتی اقیانوس می‌باشد به منظور تولید انرژی الکتریکی در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله دلایل این امر افزایش ناگهانی قیمت نفت در پایان دهه ۱۹۷۰، مشکلات زیست محیطی ناشی از سوخت-های فسیلی به مانند تغییرات آب و هوایی و گرم شدن کره زمین و تلاش در جهت دستیابی به منابع انرژی پایدار و تمام نشدنی بوده است. با توجه به بالا بودن چگالی انرژی امواج، تکنولوژی‌های مختلفی در جهان به منظور تبدیل این انرژی به انرژی الکتریکی توسعه یافته است. متأسفانه رشد مبدل‌های انرژی امواج در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند توربین-های بادی و سیستم فتوولتائیک کمتر بوده است و این امر ناشی از هزینه بالای تولید برق توسط این مبدل‌ها می‌باشد. مطالعاتی که تاکنون در زمینه انرژی امواج صورت گرفته است بیشتر بر اصول کارکرد این تکنولوژی‌ها و هزینه تمام شده آن‌ها تمرکز نموده و جنبه‌های دیگر این مبدل‌ها در نظر گرفته نشده است. از طرف دیگر قابلیت اطمینان در شبکه‌های برق امروزی به یکی از مهمترین فاکتورها تبدیل شده و یکی از خواسته‌های مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی از تولیدکنندگان و توزیع-کنندگان برق این است که برق ارائه شده به آن‌ها در عین داشتن استانداردهای لازم در زمینه کیفیت توان، کمترین قطعی را داشته باشد. بر همین اساس به منظور پر نمودن شکاف ایجاد شده در زمینه مطالعه قابلیت اطمینان مبدل انرژی امواج از نوع بایو این مقاله تدوین شده است. در مرحله اول لازم است با شناخت اصول کارکرد، اجزای تشکیل دهنده و روابط توان تولیدی آن‌ها بر حسب پارامترهای مهم امواج شامل ارتفاع و دوره تناوب موج که در تعیین میزان انرژی امواج موثر هستند، یک مدل قابلیت اطمینان برای این مبدل‌ها توسعه یابد. در توسعه این مدل هم باید خرابی المان‌های تشکیل دهنده و هم تغییرات توان خروجی این نیروگاه‌ها که ناشی از تغییرات زیاد در ارتفاع و دوره تناوب امواج است مورد توجه قرار بگیرد. در ادامه تکنیک مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها معرفی شده و شاخص‌های مهم قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها محاسبه می‌شود. به منظور بررسی روش پیشنهادی، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های تست استاندارد RBTS و IEEE-RTS با حضور مبدل بایو انجام گرفته و تأثیر این نیروگاه‌ها در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** قابلیت اطمینان، مبدل بایو، روش تحلیلی، نیروگاه امواج.

نام نویسنده‌ی مسئول: میلاذ برزین

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند انرژی باد، خورشید، زمین گرمایی و اقیانوس سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای نشده و مشکلات زیست محیطی به مانند گرم شدن کره زمین و آب شدن یخ‌های قطبی، تخریب لایه ازن و تغییرات آب و هوایی را به دنبال ندارند. از طرف دیگر این منابع پایدار بوده و نگرانی از پایان یافتن آن‌ها وجود ندارد. این مزایا به همراه داشتن هزینه بهره‌برداری ناچیز (به دلیل نداشتن قیمت سوخت) سبب شده است امروزه در کشورهای مختلف جهان برنامه‌هایی جهت توسعه نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر وجود داشته باشد. به گونه‌ای که انتظار می‌رود در آینده نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی شوند. تحقق یافتن این امر به پیشرفت تکنولوژی‌های ساخت نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و قیمت تمام شده آن‌ها از یک طرف و اعمال محدودیت‌های بیشتر در زمینه جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان از طرف دیگر برمی‌گردد. در انتهای دهه ۱۹۷۰ میلادی قیمت نفت دچار یک افزایش شدید و ناگهانی گردید به گونه‌ای که بسیاری از کشورها به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی روی آوردند و همزمان استفاده از نیروگاه‌های بادی و امواج مطرح شد. امروزه شاهد هستیم که توربین‌های بادی به سرعت توسعه یافته و هم‌اکنون در سطح جهان نیروگاه‌های و مزارع بادی با ظرفیت زیاد نصب شده‌اند در حالی که نیروگاه‌های امواج نتوانسته‌اند چنین جایگاهی را در بازار رقابتی برق جهانی کسب نمایند. دلیل این امر هزینه تمام شده بالای مربوط به نیروگاه‌های امواج بوده است به گونه‌ای که در حال حاضر بالاترین قیمت انرژی الکتریکی مربوط به نیروگاه‌های جزرومدی و امواج می‌باشد. بنابراین لازم است در زمینه توسعه و پیشرفت مبدل‌های انرژی امواج در جهت کاهش هزینه برق تولیدی آن‌ها تحقیقات گسترده‌ای صورت پذیرد. در همین راستا و با توجه به تحقیقات گسترده‌ای که در این چند دهه بر روی این نیروگاه‌ها انجام شده است مبدل‌های مختلفی بر اساس تکنولوژی‌های مختلف توسعه یافته‌اند به گونه‌ای که گفته می‌شود تاکنون ۱۵۰ نوع تکنولوژی در زمینه تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی معرفی و ساخته شده است. البته برخی از این تکنولوژی‌ها به دلیل مزیت‌های فنی و اقتصادی به تولید تجاری رسیده و هم‌اکنون در نقاط مختلف جهان در حال بهره‌برداری و تولید انرژی الکتریکی هستند و برخی دیگر در حد ساخته شدن یک نمونه آزمایشگاهی پیش رفته‌اند.

مقایسه‌ای که تاکنون بر روی مبدل‌های مختلف انرژی امواج صورت گرفته است تنها بر مشخصات فنی، اصول کارکرد و نحوه تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی، هزینه تمام شده مبدل، مکان نصب و تکنولوژی به کار رفته در زمینه تولید برق تمرکز نموده و سایر جنبه‌ها را لحاظ ننموده است. از طرف دیگر امروزه قابلیت اطمینان به یکی از موضوعات مهم در بسیاری از زمینه‌ها به مانند هوافضا، انرژی هسته‌ای و سیستم قدرت تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که انتظار می‌رود سیستم‌های مختلف به گونه‌ای طراحی و ساخته شوند که در طول عمر مفید خود حداقل خرابی را داشته باشند. با توجه به گسترش استفاده از انرژی الکتریکی در کاربردهای مختلف خانگی، صنعتی، کشاورزی، تجاری و ... امروزه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی انتظار دارند شرکت‌های برق، برق با کیفیت بالا و بدون قطعی به آن‌ها ارائه نمایند. بر همین اساس است که در کشورهایی که بازارهای برق توسعه یافته است هزینه قطعی بار بسیار بالا در نظر گرفته شده و شرکت‌های برق به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از جریمه قطعی بار به اصلاح شبکه خود و بالا بردن قابلیت اطمینان آن پرداخته‌اند. با توجه به اینکه تاکنون مبدل‌های انرژی امواج از نقطه نظر قابلیت اطمینان بررسی نشده‌اند این مقاله در نظر دارد یکی از این مبدل‌ها که مبدل انرژی امواج بایو نام دارد را مورد بررسی قرار داده و قابلیت اطمینان آن را ارزیابی نماید. با توجه به این هدف، در ابتدا لازم است آشنایی کامل با این مبدل‌ها صورت پذیرد به گونه‌ای که مشخصات این مبدل‌ها، اصول کارکرد، چگونگی تبدیل انرژی موج به انرژی الکتریکی و میزان توان تولیدی آن‌ها بر اساس پارامترهای مهم موج که شامل ارتفاع و دوره تناوب موج می‌باشد مشخص شود. سپس مدل قابلیت اطمینان این مبدل‌ها استخراج و شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور این تکنولوژی‌ها محاسبه شود.

در زمینه مطالعه نیروگاه‌های امواج و قابلیت اطمینان سیستم قدرت تاکنون کارهای پژوهشی زیادی انجام شده است. در [1] وضعیت استفاده از انرژی تجدیدپذیر اقیانوس به منظور تولید برق در سال ۲۰۱۵ آورده شده است. در این گزارش بیان شده است که اقیانوس و دریاها در تأمین انرژی پاک نقش مهمی بازی می‌کنند. در [2] مطالعه آماری بر روی تعادل محلی بین باد و

امواج باد با استفاده از داده‌های مربوط به ایستگاه‌های بایو اقیانوس صورت گرفته است. این داده‌ها از ۴ ایستگاه بایو در دریاهای نزدیک ژاپن جمع‌آوری شده است. در [3] انرژی امواج و مبدل‌های مورد استفاده برای تبدیل این انرژی به انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مرجع یک سیستم برای بهره‌برداری با درایو مستقیم و قابل نصب در دریا و دور از ساحل به عنوان مبدل انرژی امواج معرفی شده است. در [4] مبدل انرژی امواج مبتنی بر تولید برق توسط ژنراتور سنکرون خطی متصل به بایو مورد بررسی قرار گرفته است. این ژنراتور در بستر دریا قرار گرفته و توسط یک بایو جاذب نقطه‌ای در سطح اقیانوس درایو می‌شود. در [5] تکنولوژی‌های مختلف تولید برق از انرژی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. در [6] مشکلات طراحی و انتخاب سیستم‌های نگهدارنده مبدل‌های انرژی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله انواع مختلف مبدل‌های انرژی و ملزومات مربوط به نگهدارنده‌های این سیستم‌ها مطالعه شده است. در [7] تولید انرژی الکتریکی از منابع انرژی اقیانوس شامل امواج، جزرومد، انرژی حرارتی اقیانوس و جریان‌های دریایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع بیان شده است که افزایش ناگهانی قیمت نفت در دهه ۱۹۷۰ منجر به تلاش جهت جایگزین نمودن سوخت‌های فسیلی شده است. در [8] تجهیز بالارونده به عنوان یکی از نمونه مبدل‌های انرژی امواج مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مرجع بیان شده است که توان موج انتقال انرژی توسط امواج سطحی اقیانوس بوده و می‌توان از آن به منظور تولید برق، پمپ نمودن آب به مخزن ذخیره و نمک‌زدایی آب استفاده کرد. در [9] روش ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های انرژی امواج مبتنی بر تکنولوژی پلامیس بیان شده است. در این مقاله قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید بدون در نظر گرفتن اثر سیستم انتقال مطالعه شده است. در [10] ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه شیار مخروطی که یکی از انواع مهم نیروگاه‌های امواج می‌باشد انجام شده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای این نیروگاه‌های امواج به دست آورده شده است. مقاله [11] قابلیت اطمینان انواع مختلف نیروگاه‌های امواج را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله مدل قابلیت اطمینان تکنولوژی‌های مختلف نیروگاه‌های امواج شامل پلامیس، بایو، نیروگاه شیار مخروطی و اژدهای موج به دست آمده است. با توجه به این که تاکنون قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بایو که یکی از انواع متداول نیروگاه‌های امواج می‌باشند، بررسی نشده است نوآوری این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل‌های انرژی امواج بایو

تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های امواج بایو

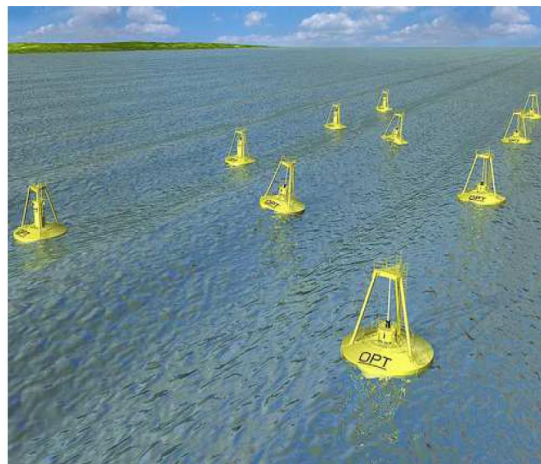
به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه امواج بایو ساختار این مقاله به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه بایو به عنوان یکی از مبدل‌های انرژی امواج معرفی می‌شود. در بخش سوم روش ارزیابی قابلیت اطمینان این نیروگاه بیان و نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم آورده می‌شود. نتیجه‌گیری این مقاله نیز در بخش پنجم آورده شده است.

## ۲- نیروگاه امواج بایو

سابقه استفاده از انرژی امواج به قرن ۱۸ برمی‌گردد اما در سال ۱۹۷۳ به دلیل افزایش ناگهانی قیمت نفت توجه به سمت استفاده از انرژی امواج معطوف شد و در پایان دهه ۸۰ با تثبیت قیمت نفت این نگاه کمتر شد. البته همزمان با مطرح شدن استفاده از انرژی امواج به منظور تولید برق توربین‌های بادی نیز به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفتند. با توجه به هزینه پایین‌تر تولید برق توسط توربین‌های بادی این توربین‌ها به سرعت رشد کرده و تکنولوژی آن‌ها به بلوغ رسید. به گونه‌ای که در حال حاضر در سطح جهان مزارع بادی با ظرفیت‌های زیاد و تا چند صد مگاوات نیز به بهره‌برداری رسیده‌اند. اما متأسفانه تکنولوژی نیروگاه‌های امواج به دلیل بالاتر بودن هزینه تولید برق نتوانست به جایگاه خود برسد و هم‌اکنون مبدل‌های انرژی امواج به صورت پراکنده در جهان نصب شده‌اند و هنوز به بلوغ نرسیده‌اند. بر همین اساس تحقیقات در زمینه توسعه نیروگاه‌های امواج و ساخت مبدل‌های مختلف هنوز ادامه دارد. اما در سال‌های اخیر به دلیل مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی به مانند آلودگی و تلاش در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله دی-اکسیدکربن نگاه‌ها دوباره به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف شده است.

متأسفانه هنوز تکنولوژی‌های تولید برق از امواج به مرحله اقتصادی قابل مقایسه با سایر منابع انرژی نرسیده‌اند. در طراحی یک مبدل انرژی امواج باید فاکتورهای اقتصادی، قابلیت اطمینان و بازده انرژی مورد توجه قرار بگیرد. پلامیس، نوسانگر موج

ارشمیدس و لیمپت از جمله نیروگاه‌های امواج نصب شده هستند. مبدل‌های انرژی امواج از دو نقطه‌نظر مکان نصب و روش تولید برق دسته‌بندی شده‌اند. از نظر مکان نصب سه نوع مبدل ساحلی، نزدیک ساحل و دور از ساحل وجود دارد. در ساحل امواج انرژی کمتری دارند و خطر آسیب به تجهیزات کمتر است، انتقال توان و همچنین عملیات نگهداری مبدل راحت‌تر است. اما عیب این مبدل‌ها چگالی انرژی موج کمتر و مشکلات ناشی از جزرومد در سواحل است. در مکان‌های نزدیک ساحل عمق آب کم بوده و کمتر از یک چهارم طول موج می‌باشد. تجهیزات به کف دریا متصل شده که برای سیستم نگهدارنده مبدل مناسب است. اما چگالی انرژی امواج در این مناطق نیز کم است. تجهیزات دور از ساحل در آب عمیق نصب شده (با عمق بیشتر از ۴۰ متر) که عمق آب در این مناطق تقریباً یک سوم طول موج است. چگالی انرژی موج در این مناطق بیشتر است اما سیستم نگهدارنده و عملیات نگهداری تجهیزات مشکل‌تر است و به دلیل بروز طوفان باید تجهیزات استقامت این ضربات را داشته باشند و لذا تجهیز گران‌تر خواهد بود. به لحاظ اصول کارکرد مبدل‌های انرژی امواج در سه گروه قرار می‌گیرند: موج-شکن، جاذب نقطه‌ای و قطع‌کننده موج. موج‌شکن به صورت موازی با جهت موج قرار گرفته و پلامیس یک نمونه از این تجهیز است. جاذب نقطه‌ای دومین گروه است که به تجهیزاتی که ابعاد کوچکی در مقایسه با طول موج تابش دارند گفته شود. آن‌ها می‌توانند ساختار شناور که حرکت بالا و پایین بر سطح آب دارند داشته باشند و یا به صورت غوطه‌ور در زیر آب بر اساس میزان فشار قرار بگیرند. به خاطر اندازه کوچکشان جهت موج برای این تجهیزات مهم نیست. یک نمونه از این نوع مبدل‌ها، بایوها هستند که بر این اساس کار می‌کند و در شکل زیر نشان داده شده‌اند. تجهیز سوم قطع‌کننده موج است که محور موازی با پیشانی موج داشته و عمود بر جهت امواج است و موج را دنبال می‌کند. یک نمونه از این تجهیز اردک سلتر می‌باشد.



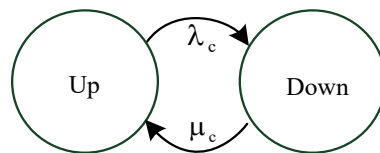
شکل (۱): تصویر بایوها

## ۲- قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور بایوها

در یک سیستم قدرت هدف تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان می‌باشد. بنابراین قابلیت اطمینان سیستم قدرت میزان توانایی این سیستم در تأمین برق مشترکین به صورت پیوسته همراه با کیفیت مطلوب و رعایت استانداردهای مربوطه می‌باشد. این توانایی در دو بخش کفایت و امنیت سیستم قدرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. کفایت سیستم قدرت زمانی فراهم می‌شود که امکانات کافی در قسمت‌های تولید، انتقال و توزیع فراهم باشد که بتواند تقاضای بار را همراه با رعایت قیود بهره‌برداری پاسخگو باشد. امنیت سیستم قدرت به توانایی این سیستم در پاسخ به هرگونه اغتشاش نظیر از دست رفتن یک واحد تولیدی و یا قطع خطوط انتقال گفته می‌شود. دو روش در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان قابل استفاده است: یکی روش تحلیلی که سیستم را با مدل ریاضی نمایش داده و شاخص‌های قابلیت اطمینان را از حل مستقیم عددی به دست می‌آورد و دیگری روش شبیه‌سازی که شاخص‌های قابلیت اطمینان را با شبیه‌سازی فرایند واقعی و رفتار تصادفی سیستم تخمین زده و مسئله را به صورت یک سری تجربه و آزمایش واقعی با لحاظ نمودن کلیه حالت‌ها و پیشامدهای موجود بررسی می‌نماید. بنابراین روش شبیه‌سازی نیاز به تکرار تا چند هزار سال و حجم محاسباتی زیاد خواهد داشت. معمولاً شبیه‌سازی مبتنی بر روش مونت‌کارلو بوده

که به دو صورت غیرترتیبی و ترتیبی انجام می‌شود. در نوع ترتیبی، ترتیب زمانی اهمیت داشته و گذشته سیستم بر نتایج بعدی سیستم تأثیر دارد. روش تحلیلی در مقایسه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو حجم محاسباتی کمتری داشته و مشکلاتی نظیر ابهام در جواب و عدم همگرایی را نخواهد داشت. در روش تحلیلی برای هر کدام از المان‌های موجود در سیستم باید یک مدل قابلیت اطمینان ارائه شود. برای به دست آوردن این مدل مراحل زیر طی می‌گردد:

- شناخت کل سیستم و چگونگی عملکرد آن
  - تعیین اجزای سیستم و مشخص نمودن زیرسیستم‌های مربوطه
  - چگونگی خراب شدن هر کدام از اجزا و به دست آوردن مدل مارکوف مربوط به آن‌ها
  - تأثیر خرابی هر کدام از اجزا بر عملکرد کل سیستم
  - تعیین مدل قابلیت اطمینان کل سیستم از ترکیب مدل بدست آمده برای هر کدام از زیرسیستم‌ها
- مدل مارکوف، حالت‌های مختلفی را که یک المان در طول عملکرد خود دارا می‌باشد در نظر گرفته و نرخ رفتن این المان از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل احتمال حالت‌های مختلف، فرکانس و همچنین تداوم این حالت‌ها تعیین می‌گردد. در شکل ۲ یک مدل مارکوف دو حالتی که برای یک المان، دو وضعیت سالم بودن و خرابی را در نظر می‌گیرد نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است المان با نرخ خرابی  $\lambda_c$  از وضعیت سالم به وضعیت خراب و با نرخ تعمیر  $\mu_c$  از وضعیت خراب به وضعیت سالم می‌رود.



شکل (۲): مدل مارکوف دو حالتی [۱۲]

احتمال سالم ( $P^{UP}$ ) و خراب بودن المان ( $P^{DOWN}$ ) در زمان عمر مفید (در این دوره نرخ خرابی ثابت است) بر اساس روابط (۱) به دست آورده می‌شوند. این روابط برای انجام مطالعات برنامه‌ریزی که زمان مطالعه به اندازه کافی بزرگ است برقرار می‌باشند و برای انجام مطالعات بهره‌برداری که زمان مطالعه کوتاه و در محدوده چند ساعت است نمی‌توانند استفاده شوند.

$$P_c^{UP} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, P_c^{DOWN} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c} \quad (1)$$

در ادامه این بخش تکنیک ارزیابی کفایت سیستم قدرت و چگونگی تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان این بخش تشریح می‌گردد. در این قسمت تکنیک ارزیابی کفایت سیستم قدرت در سطح اول (سیستم تولید) به روش تحلیلی و نحوه محاسبه شاخص‌های مهم این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت در این سطح کلیه واحدهای تولید و همچنین کلیه بارهای مصرفی به یک باس مشترک وصل شده و از تأثیر سیستم انتقال صرف‌نظر می‌گردد. در ارزیابی تحلیلی قابلیت اطمینان در سطح اول، ظرفیت‌ها و احتمالات مربوط به واحدهای تولید با مدل قابلیت اطمینان دو حالتی و یا چند حالتی در یک جدول که جدول احتمال خروج ظرفیت‌ها (COPT) نامیده می‌شود جمع‌آوری شده و از ترکیب این مدل تولید و مدل بار، ریسک سیستم و شاخص‌های مربوطه به دست می‌آید. در مطالعه کفایت سیستم قدرت شاخص‌های قابلیت اطمینانی به مانند مقدار متوسط بار قطع شده (LOLE)، متوسط انرژی تأمین نشده (EENS)، میزان بار قابل تغذیه (PLCC) و قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه (IPLCC) محاسبه می‌شوند. بار به صورت منحنی تداوم (LDC) به صورت یک خط مستقیم از ۱۰۰ درصد تا درصد مشخصی از ماکزیمم پیک بار سالانه مدلسازی می‌شود. جهت محاسبه متوسط میزان قطع بار، به ازای هر کدام از ظرفیت‌های جدول COPT میزان تولید با بار مقایسه می‌شود. مدت زمانی که به ازای هر ظرفیت سیستم قادر نیست بار را تأمین کند تعیین و میزان متوسط بار قطع شده از مقدار وزن داده شده این زمان‌ها به دست

می‌آید. در محاسبه شاخص میزان قطع بار در صورتی که میزان تولید از میزان بار کمتر باشد، چه همه بار قطع شود و چه بخشی از آن مدت زمان مربوطه به حساب آورده می‌شود. به منظور تمایز بین موارد ذکر شده از شاخصی مبتنی بر انرژی استفاده می‌شود. برای محاسبه شاخص میزان انرژی قطع شده به ازای هر کدام از ظرفیت‌های موجود در جدول COPT، میزان انرژی قطع شده به دست آمده و سپس مجموع وزن داده شده این انرژی‌ها در احتمال مربوطه شاخص متوسط انرژی قطع شده را نتیجه می‌دهد.

به منظور مطالعه کفایت سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های امواج باید دقت کرد که مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها را به دلیل تغییرات زیاد توان خروجی که ناشی از تغییرات ارتفاع و دوره تناوب موج می‌باشد نمی‌توان با دو حالت نشان داد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها چند حالت (بیش از دو حالت) داشته و علاوه بر حالت‌های سالم (توان نامی) و خراب، حالت‌های با توان کمتر از توان نامی (derated) نیز خواهند داشت. بنابراین با توجه به جدول احتمال حالت‌های این نیروگاه‌ها و ترکیب آن‌ها با جدول احتمال حالت‌های سایر نیروگاه‌ها جدول احتمال حالت‌های کلی سیستم تولید به دست آمده و با مقایسه این مدل با بار سیستم شاخص‌های مهم کفایت سیستم تولید تعیین می‌شوند.

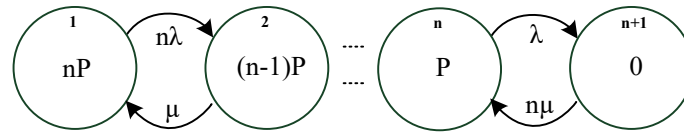
برای تعیین مدل قابلیت اطمینان مبدل امواج بایو، هم خرابی تجهیزات تشکیل دهنده و هم تغییرات توان خروجی این نیروگاه‌ها باید در نظر گرفته شود و در نهایت با تکنیک خوشه‌بندی فازی تعداد حالت‌های مدل قابلیت اطمینان کاهش یافته و به تعداد مناسب برای انجام مطالعات تحلیلی قابلیت اطمینان برسد.

مبدل امواج بایو بر روی سطح آب به صورت آزادانه شناور بوده و در نتیجه اعمال امواج (قله و دره موج) به آن قابلیت حرکت به صورت عمودی را دارد. با بالا و پایین رفتن بایو، لوله متصل به آن که درون آب غوطه‌ور می‌باشد واکنش نشان می‌دهد. یک پیستون متصل به انتهای این لوله سبب حرکت پمپ آب (پمپ شلنگ) می‌شود. در نتیجه حرکت پمپ آب، آب با فشار هل داده می‌شود که این آب وارد یک انباره به منظور صاف نمودن نوسانات توان خروجی می‌شود. تغییرات فشار ایجاد شده در آب به توربین ایمپالسی اعمال شده و توسط یک ژنراتور متصل به توربین برق تولید می‌شود. با توجه به نوسانات امواج، توان تولیدی مبدل نیز نوسانات زیادی داشته و از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت AC/DC/AC و همچنین یک ژنراتور افزاینده ولتاژ و فرکانس برق تولیدی کنترل شده و قابل اتصال به شبکه قدرت می‌باشد. به منظور انتقال توان تولیدی به ساحل نیز از کابل‌های زیردریایی استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد کوچک این مبدل، سیستم نگهدارنده آن باید طراحی مناسبی داشته باشد و در مورد بایو مورد مطالعه در این تحقیق سه سیستم نگهدارنده استفاده شده است. بنابراین می‌توان تجهیزات اصلی تشکیل دهنده این مبدل را به صورت ساختار بایو، لوله، پیستون، پمپ آب، توربین، ژنراتور، کابل زیردریایی، مبدل الکترونیک قدرت و ترانسفورماتور در نظر گرفت. با توجه به اینکه خرابی هر کدام از تجهیزات بیان شده یا مستقیماً منجر به خروجی صفر مبدل شده و یا اینکه سبب می‌شوند بهره‌بردار جهت جلوگیری از وارد آمدن خسارت بیشتر به مبدل، عملکرد آن را متوقف کند، از نقطه نظر قابلیت اطمینان اجزای اصلی تشکیل دهنده بایو با هم سری بوده و بر اساس روابط المان‌های سری می‌توان مدل دو حالت مبدل را تعیین نمود. پارامترهای مدل قابلیت اطمینان معادل یک سیستم به مانند بایو که اجزای تشکیل دهنده آن از نقطه نظر قابلیت اطمینان با هم سری هستند به صورت روابط ۲ می‌باشد. در این روابط  $\lambda_i$  نرخ خرابی المان  $\lambda$ ، نرخ خرابی معادل کل سیستم،  $r_i$  زمان تعمیر المان  $\lambda$ ،  $r$  زمان تعمیر معادل کل سیستم،  $U$  عدم دسترس پذیری المان  $\lambda$  و  $U$  عدم دسترس پذیری معادل کل سیستم می‌باشد.

$$\lambda = \sum \lambda_i, U = \sum U_i, r = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_i} \quad (2)$$

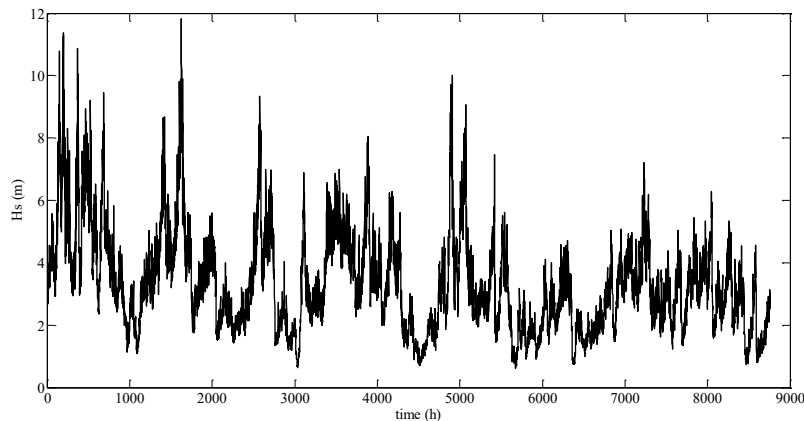
بنابراین با معادل نمودن مدل قابلیت اطمینان هر کدام از بایوها بر اساس رابطه فوق می‌توان مدل قابلیت اطمینان دو حالتی این تجهیز را با دو حالت سالم با ظرفیت نامی و خراب با ظرفیت صفر تعیین نمود. حال یک مزرعه بایو با تعداد  $n$  بایو را در نظر می‌گیریم. در این مزرعه بایو، هر کدام از واحدها عملکرد مستقلی داشته و خرابی هر واحد تأثیری روی سایر واحدها ندارد. بنابراین این  $n$  واحد از نقطه نظر قابلیت اطمینان با هم موازی هستند و هر واحد می‌تواند بدون تأثیر گذاشتن بر واحد دیگر

توان خود که در اینجا مقدار  $P$  در نظر گرفته شده است را تولید کند. بنابراین مدل قابلیت اطمینان  $n$  بایوی موازی به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۳): مدل قابلیت اطمینان  $n$  بایوی موازی

در صورتی که یک مزرعه بایو شامل  $n$  بایو وجود داشته باشد با خراب شدن هر بایو، تأثیری بر عملکرد سایر بایوها ایجاد نمی‌شود و لذا از نقطه نظر قابلیت اطمینان این  $n$  بایو با هم موازی خواهند بود. لذا مدل قابلیت اطمینان مزرعه بایو به مانند شکل ۳ خواهد بود که  $n+1$  حالت دارد. با استفاده از ماتریس توان و داشتن داده‌های ارتفاع و دوره تناوب امواج به صورت ساعت به ساعت در طول یک سال می‌توان خروجی این مبدل را به صورت ساعت به ساعت به دست آورد. در ادامه نیز به کمک روش خوشه‌بندی فازی تعداد حالت‌های توان خرووی کاهش یافته و فرض می‌شود الگوریتم خوشه‌بندی منجر به تعداد  $h$  کلاستر شود. لذا به مانند شکل ۴ مدل قابلیت اطمینان مزرعه بایو تعداد  $(n+1)h$  حالت خواهد داشت. توان خروجی نیروگاه بایو به ارتفاع و دوره تناوب امواج وابسته است و از آنجا که این دو پارامتر مرتباً در حال تغییر است، توان خروجی این مبدل نیز مرتباً تغییر می‌کند که این عدم قطعیت و تغییرات باید در مدل قابلیت اطمینان این مبدل لحاظ شود. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب ارتفاع غالب موج ( $H_s$ ) و همچنین پریود زمانی عبور از صفر ( $T_e$ ) مربوط به امواج ایجاد شده در سال به صورت ساعت به ساعت مربوط به منطقه‌ای مستعد در دریا آورده شده است. همانگونه که مشخص است هم ارتفاع غالب امواج و هم دوره تناوب آن تغییرات زیادی در طول زمان دارد. با استفاده از ماتریس توان مبدل پلامیس می‌توان ساعت به ساعت این نیروگاه را بر اساس داده‌های ارتفاع غالب امواج و همچنین دوره تناوب آن‌ها بدست آورد. برای تعیین توان خروجی بایو در نقاطی که ارتفاع موج و همچنین دوره تناوب آن بین دو مقدار مشخص در ماتریس قرار دارد از میان‌یابی استفاده شده است.

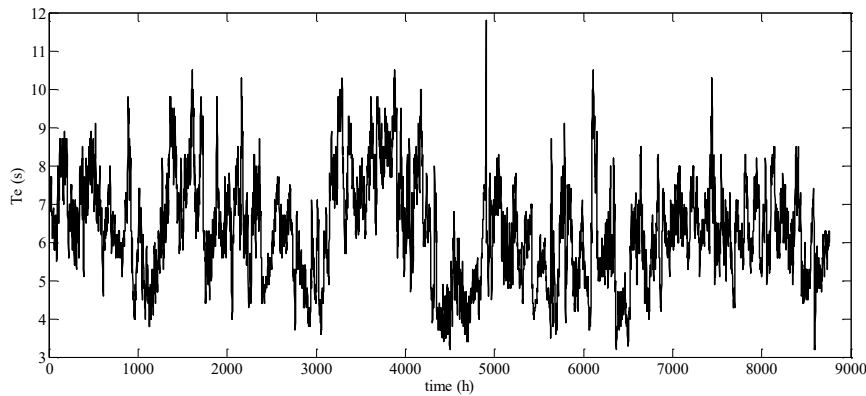


شکل (۴): نمودار ساعت به ساعت تغییرات ارتفاع غالب امواج

توان خروجی مبدل امواج دارای تعداد زیادی حالت می‌باشد که به منظور انجام مطالعات تحلیلی قابلیت اطمینان مناسب نیست. بنابراین باید به کمک یکی از روش‌های خوشه‌بندی تعداد حالت‌های توان را کاهش داد. روشی که در این تحقیق پیشنهاد می‌شود روش خوشه‌بندی فازی از نوع میانگین  $c$  می‌باشد. این الگوریتم یکی از مهمترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی می‌باشد. در این الگوریتم داده‌ها به  $c$  خوشه از قبل مشخص شده تقسیم می‌شوند در الگوریتم خوشه‌بندی  $c$  میانگین فازی تابع هدف بصورت زیر می‌باشد [13]:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (2)$$





شکل (۵): نمودار ساعت به ساعت تغییرات دوره تناوب امواج

در فرمول فوق  $m$  یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای  $m$  عدد ۲ انتخاب می‌شود. اگر در فرمول فوق  $m$  برابر ۱ قرار داده شود تابع هدف خوشه‌بندی  $c$  میانگین (کلاسیک) غیرفازی بدست می‌آید. در فرمول فوق  $x_k$  نمونه  $k$  ام،  $v_i$  نماینده یا مرکز خوشه  $i$  ام،  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد و  $u_{ik}$  میزان تعلق نمونه  $i$  ام در خوشه  $k$  ام را نشان می‌دهد. علامت  $\|\cdot\|$  میزان تشابه (فاصله) نمونه با (از) مرکز خوشه می‌باشد که می‌تواند از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد استفاده شود. از روی  $u_{ik}$  یک ماتریس  $U$  با  $c$  سطر و  $n$  ستون تعریف می‌شود که مولفه‌های آن هر مقداری بین ۰ تا ۱ را می‌توانند اختیار کنند. اگر تمامی مولفه‌های ماتریس  $U$  بصورت ۰ و یا ۱ باشند الگوریتم مشابه  $c$  میانگین کلاسیک خواهد بود. با اینکه مولفه‌های ماتریس  $U$  می‌توانند هر مقداری بین ۰ تا ۱ را اختیار کنند اما مجموع مولفه‌های هر یک از ستون‌ها باید طبق رابطه ۴ برابر ۱ باشد.

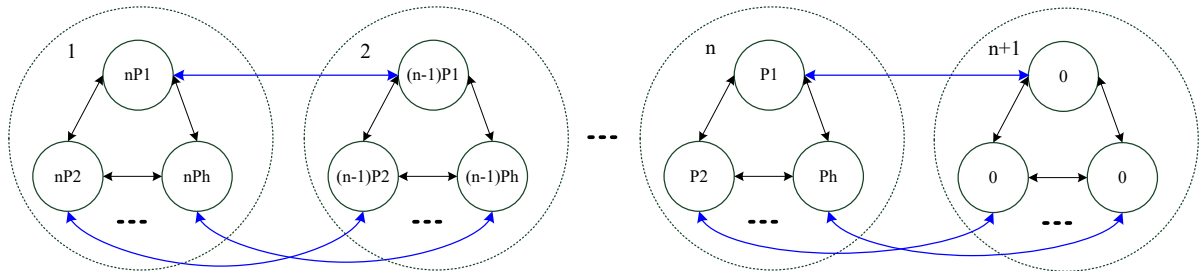
$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

معنای این شرط این است که مجموع تعلق هر نمونه به  $c$  خوشه باید برابر ۱ باشد. به منظور خوشه‌بندی توان‌های خروجی واحد پلامیس به تعداد مناسبی حالت رابطه ۴ به رابطه ساده شده ۵ تبدیل می‌گردد.

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m |x_k - v_i| \quad (5)$$

در رابطه فوق  $x_k$  داده‌های توان خروجی واحد بایو در ساعت  $k$ ام و  $v_i$  مرکز کلاستر  $i$  ام می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است در این الگوریتم باید تعداد کلاسترها در ابتدای الگوریتم به عنوان ورودی وارد شود. این تحقیق به دنبال روشی است که تعداد کلاسترها را خود الگوریتم تعیین نماید. برای این منظور به ازای تعداد کلاسترهای از ۲ تا یک مقدار دلخواه مناسب مقدار تابع هدف رابطه ۵ محاسبه می‌شود. مسلماً هر چه تعداد کلاسترها بیشتر شود مقدار تابع هدف کمتر می‌شود به گونه‌ای که اگر تعداد کلاسترها با تعداد داده‌ها برابر شود مقدار تابع هدف صفر می‌شود. به هر حال اگر نمودار تابع هدف بر حسب تعداد کلاسترها رسم شود مشاهده می‌شود روند کاهشی تابع هدف به ازای تعداد کلاسترهای بیشتر از یک مقدار مشخص کند می‌شود و می‌توان آن مقدار مشخص را به عنوان تعداد مناسب برای کلاسترها در نظر گرفت. پس از اعمال روش خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها (کلاسترها)، مرکز حالت‌ها و داده‌های متعلق به هر حالت تعیین می‌شوند. اگر یک مزرعه بایو با  $n$  بایو مشابه در نظر گرفته شود و این‌گونه فرض شود که داده‌های ارتفاع و دوره تناوب امواج و همچنین ماتریس توان بایوها گونه‌ای باشد که با اعمال خوشه‌بندی تعداد  $h$  حالت مختلف (کلاستر) برای هر کدام از بایوها حاصل شود (توان‌های از  $P_1$  تا  $P_h$ )، مدل قابلیت اطمینان این مزرعه بایو به صورت نشان داده شده در شکل ۶ خواهد بود. مقادیر ظرفیت مربوط به هر کدام از حالت‌ها، احتمال آن‌ها و نرخ گذر بین حالت‌های مختلف به راحتی بر اساس روابط قابلیت اطمینان به دست می‌آید. همان‌گونه که مشخص است

این مدل قابلیت اطمینان دارای  $h \times (n+1)$  حالت می‌باشد. در این مدل حالت‌های با ظرفیت یکسان می‌توانند با هم ترکیب شده و بر این اساس یک مدل با تعداد حالت‌های کمتر و غیر تکراری برای مزرعه بایو به دست می‌آید.



شکل (۶): مدل کامل قابلیت اطمینان مزرعه بایو

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش مدل قابلیت اطمینان مربوط به نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی Aqua Buoy با توان نامی ۲۵۰ کیلووات، به دست آمده و در مطالعات کفایت سیستم‌های تولید RBTS و IEEE-RTS مورد استفاده قرار گرفته است. فرض شده است مبدل‌های انرژی امواج که مورد مطالعه قرار می‌گیرند به صورت زیر باشد: یک مزرعه امواج ۲۰ مگاواتی شامل ۸۰ مبدل بایو با توان نامی ۲۵۰ کیلووات. در جدول زیر نیز ماتریس توان این مبدل‌های انرژی امواج که وابستگی بین تولیدی و ارتفاع دوره تناوب موج را بیان می‌کند آورده شده است. به کمک این ماتریس می‌توان در هر لحظه از زمان با داشتن داده‌های ارتفاع و دوره تناوب موج، توان خروجی مبدل را بدست آورد. به منظور تعیین توان خروجی این مبدل‌ها از داده‌های ساعت به ساعت ارتفاع و دوره تناوب امواج در طول سال مربوط به منطقه‌ای در دریا استفاده شده است.

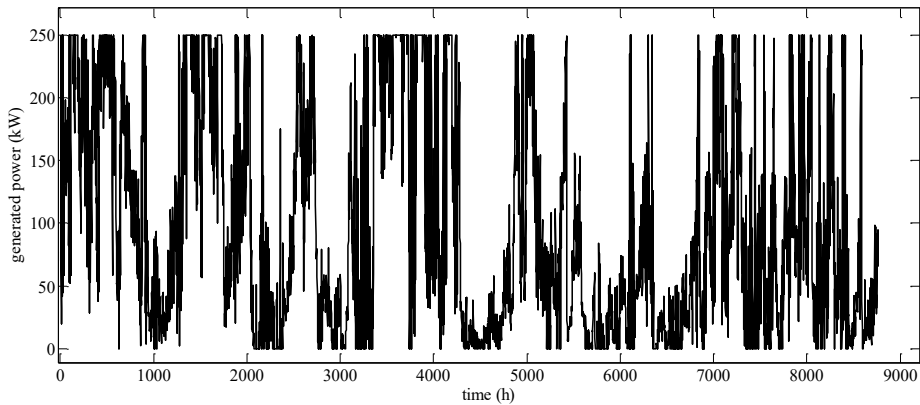
جدول (۱): ماتریس توان نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی Aqua Buoy با توان نامی ۲۵۰ کیلووات [14]

$T_p$ (s) $H_s$ (m)	Power matrix (in kW)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
1.5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
2	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
2.5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
3	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
3.5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
4	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
4.5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
5	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
5.5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

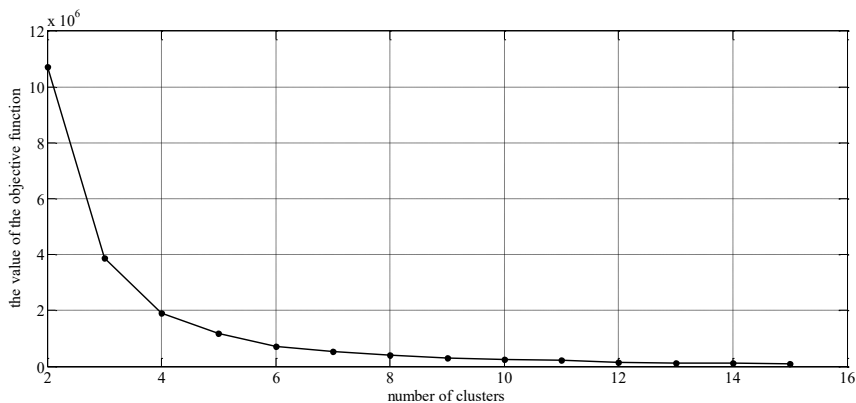
با توجه به داده‌های ساعت به ساعت ارتفاع و دوره تناوب امواج واقع در منطقه مورد مطالعه که در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است و همچنین به کمک ماتریس توان مبدل‌های فوق، توان خروجی ساعت به ساعت هر کدام از این مبدل‌ها محاسبه و در شکل زیر نشان داده شده است. این داده‌ها مربوط به یک منطقه مستعد از نظر انرژی امواج در کانادا می‌باشد که دلیل استفاده از آن‌ها مستعد بودن این منطقه از نظر انرژی امواج بوده است. این داده‌ها در مرجع [14] ارائه شده است.

در شکل ۸ نیز برای توان خروجی مبدل بایو، نمودار مقدار تابع هدف الگوریتم خوشه‌بندی بر حسب تعداد خوشه‌ها رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است افزایش تعداد کلاسترها سبب کاهش تابع هدف شده اما پس از رسیدن به ۶ کلاستر، افزایش تعداد کلاسترها منجر به کاهش چندانی در تابع هدف نشده است و لذا ۶ کلاستر به منظور مدل نمودن مبدل بایو انتخاب شده است. در جدول ۲ نیز ظرفیت و احتمال مربوط به این ۶ حالت آورده شده است. در این قسمت فرض می‌شود

نرخ خرابی و تعمیر اجزای تشکیل دهنده مبدل بایو به گونه‌ای باشد که نرخ خرابی و تعمیر معادل کل سیستم ۲ خرابی در سال و ۹۸ تعمیر در سال باشد. لذا احتمال خرابی سیستم ۰/۰۲ خواهد بود. با در نظر گرفتن یک مزرعه بایو به ظرفیت ۲۰ مگاوات که شامل ۸۰ مبدل بایو ۲۵۰ کیلوواتی می‌باشد، مدل قابلیت اطمینان این مزرعه به صورت نشان داده شده در جدول ۳ خواهد بود. در این مدل از حالت‌های با احتمال کمتر از ۰/۰۰۰۱ صرف نظر شده است.



شکل (۷): توان خروجی مبدل بایو ۲۵۰ کیلوواتی



شکل (۸): نمودار تابع هدف بر حسب تعداد کلاسترها برای توان خروجی مبدل بایو

جدول (۲): نتایج خوشه‌بندی توان خروجی مبدل بایو

Capacity (kW)	Probability
6.9	0.246461
41.8	0.230479
85	0.156393
139.2	0.125
194.4	0.075913
246.3	0.165753

در این بخش مطالعه قابلیت اطمینان سیستم تست RBTS با حضور نیروگاه‌های امواج مدل شده در قسمت قبل صورت می‌گیرد. این سیستم دارای ۲۴۰ مگاوات واحد نصب شده شامل ۲ واحد ۵ مگاواتی، یک واحد ۱۰ مگاواتی، ۵ واحد ۲۰ مگاواتی و ۳ واحد ۴۰ مگاواتی با پیک بار سالانه ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. مدل بار به صورت یک خط مستقیم بوده که از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد پیک بار ماکزیمم تداوم دارد.

جدول (۳): مدل قابلیت اطمینان مزرعه بایو

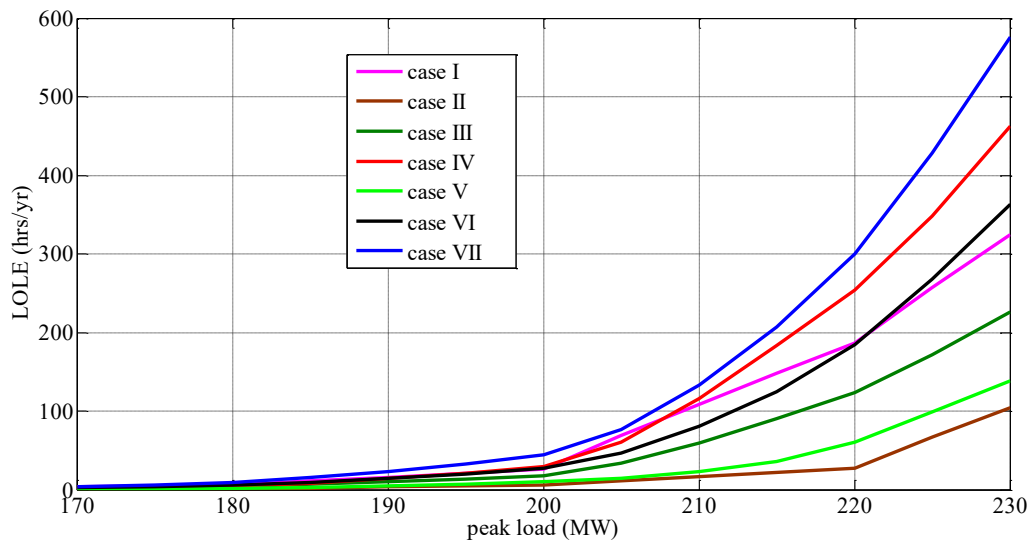
Capacity (MW)	Probability	Capacity (MW)	Probability
0.5037	0.000229	3.2186	0.031974
3.0514	0.000214	6.545	0.021696
6.205	0.000146	10.7184	0.017341
10.1616	0.000116	14.9688	0.010531
17.9799	0.000154	18.9651	0.022994
0.5106	0.001063	0.5382	0.064436
3.0932	0.000994	3.2604	0.060258
6.29	0.000674	6.63	0.040888
10.3008	0.000539	10.8576	0.032681
14.3856	0.000327	15.1632	0.019847
18.2262	0.000715	19.2114	0.043335
0.5175	0.004167	0.5451	0.079933
3.135	0.003896	3.3022	0.07475
6.375	0.002644	6.715	0.050722
10.44	0.002113	10.9968	0.040541
14.58	0.001283	15.3576	0.024621
18.4725	0.002802	19.4577	0.053758
0.5244	0.013432	0.552	0.048959
3.1768	0.012561	3.344	0.045784
6.46	0.008523	6.8	0.031067
10.5792	0.006812	11.136	0.024831
14.7744	0.004137	15.552	0.01508
18.7188	0.009033	19.704	0.032927
0.5313	0.034191		

به منظور انجام مقایسه بین واحدهای متعارف و تکنولوژی‌های مختلف نیروگاه امواج در مطالعات قابلیت اطمینان ۷ حالت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

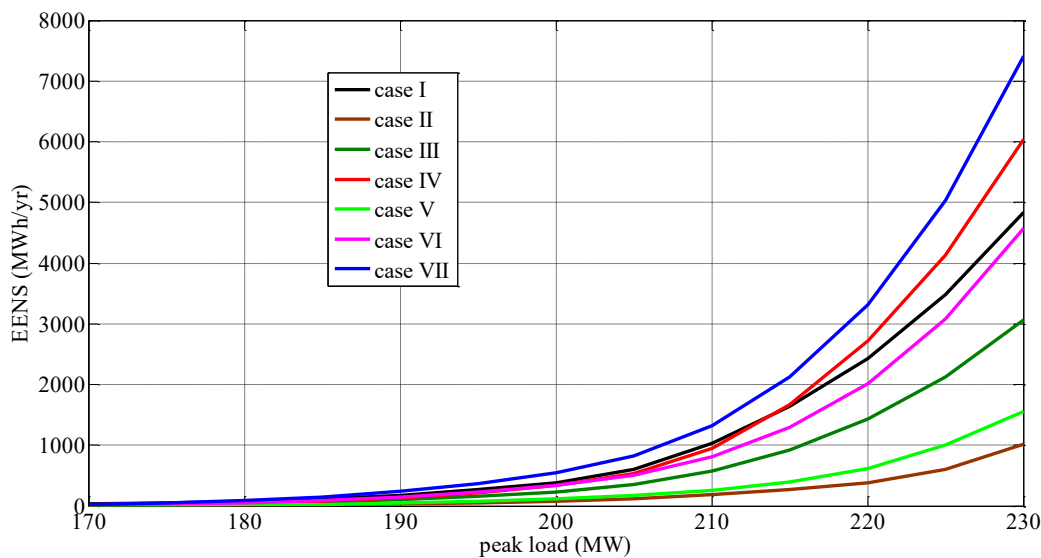
- حالت اول: سیستم تست RBTS بدون اضافه نمودن واحد جدید
- حالت دوم: به سیستم تست RBTS یک واحد متعارف ۲۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ اضافه می‌شود.
- حالت سوم: یک مزرعه امواج ۲۰ مگاواتی شامل ۸۰ مبدل مبتنی بر تکنولوژی Aqua Buoy با توان نامی ۲۵۰ کیلووات، به سیستم RBTS اضافه می‌شود.
- حالت چهارم: یک مزرعه امواج ۲۰/۲۵۰ مگاواتی شامل ۲۷ پلامیس با توان نامی ۷۵۰ کیلووات، به سیستم RBTS اضافه می‌شود.
- حالت پنجم: یک مزرعه امواج ۲۰/۱۰۰ مگاواتی شامل ۶۷ مبدل Oyster با توان نامی ۳۰۰ کیلووات، به سیستم RBTS اضافه می‌شود.
- حالت ششم: یک مزرعه امواج ۲۱ مگاواتی شامل ۳ اژدهای موج با توان نامی ۷ مگاوات به سیستم RBTS اضافه می‌شود.
- حالت هفتم: یک مزرعه امواج ۲۰ مگاواتی شامل یک SSG با توان نامی ۲۰ مگاوات می‌باشد به سیستم RBTS اضافه می‌شود.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب شاخص‌های متوسط زمان قطع بار بر حسب ساعت در سال و متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب مگاوات ساعت در سال نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش پیک بار شاخص‌های مقدار متوسط بار قطع شده و متوسط انرژی تأمین نشده افزایش یافته و قابلیت اطمینان سیستم کاهش می‌یابد. همچنین از این دو نمودار بر حسب پیک بار نتیجه می‌شود که مبدل‌های امواج با ظرفیت برابر واحدهای متداول و متعارف تأثیر کمتری در بهبود قابلیت

اطمینان دارند. این امر به دلیل عدم قطعیت موجود در ارتفاع و دوره تناوب امواج می‌باشد که سبب می‌شود توان خروجی نیروگاه‌های امواج در بیشتر اوقات کمتر از توان نامی باشد.



شکل (۹): نمودار متوسط زمان قطع بار بر حسب پیک بار



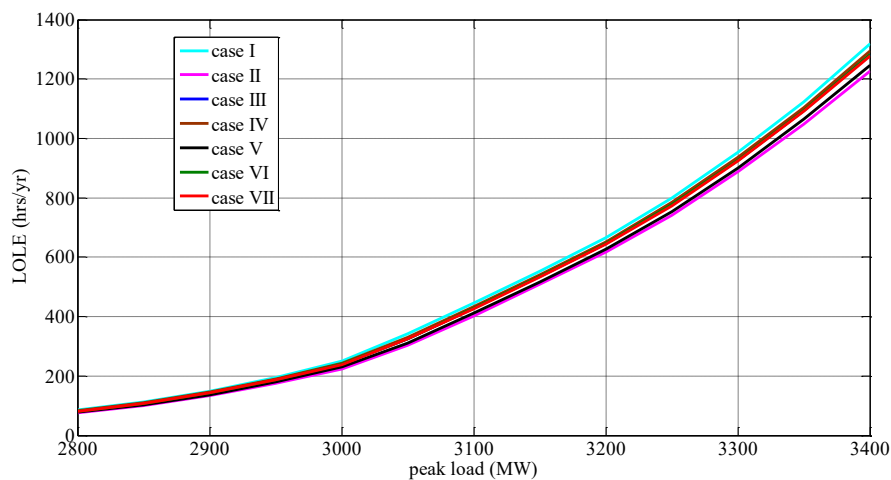
شکل (۱۰): نمودار متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار

در این قسمت سیستم تست IEEE-RTS مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بار نیز به صورت یک خط راست که از ۱۰۰ درصد تا ۶۰ درصد مقدار ماکزیمم پیک بار سالانه امتداد دارد مدل شده است. مقدار پیک بار سالانه ۲۸۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. در این قسمت هر کدام از تکنولوژی‌های نیروگاه‌های امواج با مشخصات گفته شده در بخش قبل و همچنین یک واحد متعارف با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ را به این سیستم اضافه نموده و شاخص‌های قابلیت اطمینان متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تأمین نشده محاسبه می‌شود. حالت‌های مختلفی که مورد مطالعه قرار می‌گیرند عبارتند از:

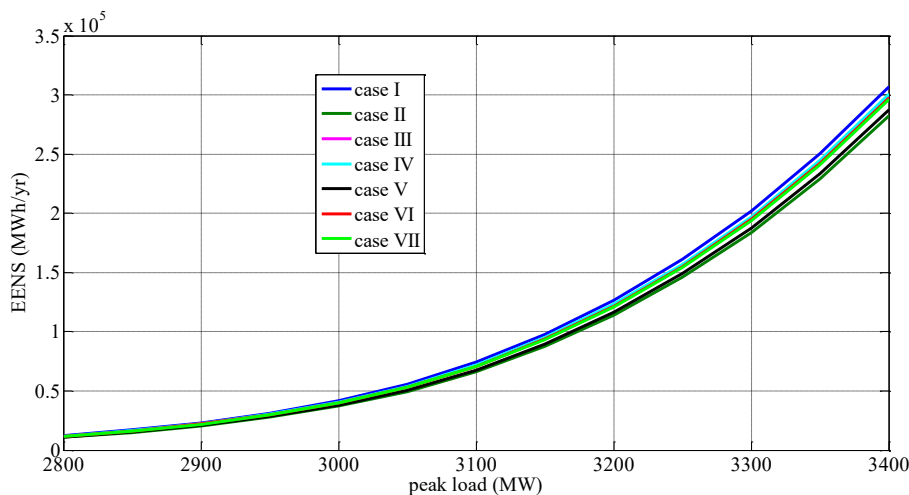
- حالت اول: سیستم تست IEEE-RTS بدون اضافه نمودن واحد جدید
- حالت دوم: به سیستم تست IEEE-RTS یک واحد متعارف ۲۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ اضافه می‌شود.
- حالت سوم: یک مزرعه امواج ۲۰ مگاواتی شامل ۸۰ مبدل مبتنی بر تکنولوژی Aqua Buoy با توان نامی ۲۵۰ کیلووات، به سیستم IEEE-RTS اضافه می‌شود.

- حالت چهارم: یک مزرعه امواج ۲۰/۲۵۰ مگاواتی شامل ۲۷ پلامیس با توان نامی ۷۵۰ کیلووات، به سیستم IEEE-RTS اضافه می‌شود.
- حالت پنجم: یک مزرعه امواج ۲۰/۱۰۰ مگاواتی شامل ۶۷ مبدل Oyster با توان نامی ۳۰۰ کیلووات، به سیستم IEEE-RTS اضافه می‌شود.
- حالت ششم: یک مزرعه امواج ۲۱ مگاواتی شامل ۳ اژدهای موج با توان نامی ۷ مگاوات به سیستم IEEE-RTS اضافه می‌شود.
- حالت هفتم: یک مزرعه امواج ۲۰ مگاواتی شامل یک SSG با توان نامی ۲۰ مگاوات می‌باشد به سیستم IEEE-RTS اضافه می‌شود.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب شاخص‌های متوسط زمان قطع بار و همچنین متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها نیز مشخص است اضافه شدن نیروگاه‌های امواج قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌دهند اما تأثیر این واحدها در بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت در مقایسه با واحدهای متعارف کمتر می‌باشد.



شکل (۱۱): نمودار متوسط زمان قطع بار بر حسب پیک بار



شکل (۱۲): نمودار متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی بایو در سطح اول انجام شده است. توسعه مدل قابلیت اطمینان مبدل‌های بایو کار دشواری نخواهد بود و به راحتی با در نظر گرفتن نرخ خرابی المان‌های تشکیل دهنده و بررسی

تأثیر خرابی این المان‌ها بر عملکرد کلی سیستم مدل مارکوف آن‌ها بدست می‌آید. سپس بر اساس سیستم تبدیل انرژی این مبدل‌ها و رابطه بین توان خروجی و پارامترهای اصلی امواج نظیر ارتفاع و دوره تناوب موج که معمولاً توسط سازندگان به صورت یک ماتریس داده می‌شود توان خروجی این مبدل‌ها در شرایط مختلف امواج و برای زمان‌های مختلف یک سال به صورت ساعت به ساعت و یا در بازه‌های زمانی دیگر بدست می‌آید. در مرحله بعد به دلیل زیاد بودن تعداد حالت‌های مربوط به توان تولیدی که از تغییرات زیاد ارتفاع و دامنه موج ناشی می‌شود باید تعداد حالت‌ها به کمک تکنیک خوشه‌بندی فازی کاهش یابد. در پایان نیز مدل مارکوف به دست آمده با در نظر گرفتن خرابی المان‌های تشکیل دهنده با مدل به دست آمده از تغییرات توان خروجی ترکیب شده و مدل کلی نیروگاه بدست می‌آید.

برای مبدل‌های انرژی امواج که در نقاط مختلف جهان نصب شده‌اند مدل قابلیت اطمینان چند حالت به دست آمد و با اضافه نمودن این مبدل‌ها به سیستم‌های تست RBTS و IEEE-RTS شاخص‌های مهم کفایت این سیستم‌ها به کمک نرم‌افزار متلب بدست آمد. نتایج عددی این مطالعه نشان می‌دهد که با اضافه شدن نیروگاه‌های امواج به سیستم قدرت شاخص‌های قابلیت اطمینان این سیستم بهبود پیدا می‌کند اما میزان بهبود ناشی از اضافه شدن این واحدها در مقایسه با اضافه شدن واحدهای متعارف کمتر خواهد بود؛ دلیل این امر این است که واحدهای متعارف توان نامی خود را به صورت ثابت به شبکه تحویل می‌دهند اما نیروگاه‌های امواج به دلیل تغییرات ارتفاع و دوره تناوب امواج در بیشتر مواقع توانی کمتر از ظرفیت نامی خود را به شبکه تحویل می‌دهند.

## References

### مراجع

- [1] D. Magagna, A. Uihlein, "2014 JRC Ocean Energy Status Report", European Commission Joint Research Centre, 2015.
- [2] N. Ebuchi, Y. Toba, H. Kawamura, "Statistical study on the local equilibrium between wind and wind waves by using data from ocean data buoy stations", *J. Oceanogr.*, vol. 48, no. 1, pp. 77–92, 1992.
- [3] M. Stålberg et al., "Full-Scale Testing of PM Linear Generator for Point Absorber WEC", presented at the 6th EWTEC Conference, Glasgow, Aug. 28–Sep. 3, 2005.
- [4] R. Waters et al., "Ocean wave energy absorption in response to wave period and amplitude—offshore experiments on a wave energy converter", *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 6, pp. 465–469, 2011.
- [5] "Home Page", Oregon Wave Energy Trust, [Online]. Available: <http://www.oregonwave.org/>. Accessed on: Sep. 1, 2025.
- [6] R. E. Harris, L. Johanning, J. Wolfram, "Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices", presented at the Marec2004 Conf., 2004.
- [7] P. Meisen, A. Loiseau, "Ocean energy technologies for renewable energy generation", Global Energy Network Institute, 2009.
- [8] G. Bevilacqua, B. Zanuttigh, "Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development", 2011.
- [9] A. Ghaedi et al., "Reliability modeling of wave energy converters based on pelamis technology", *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 227, p. 109977, 2024.
- [10] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Reliability assessment of composite power systems containing sea wave slot-coned generators", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 16, pp. 3172–3180, 2020.
- [11] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, "Reliability modeling of different wave energy conversion technologies", *Elect. Eng.*, pp. 1–25, 2024.
- [12] R. Billinton, R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed. New York and London: Plenum Press, 1994.
- [13] R. L. Cannon, V. D. Jitendra, J. C. Bezdek, "Efficient Implementation of the Fuzzy c-Means Clustering Algorithms", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, no. 2, pp. 248–255, Mar. 1986.
- [14] D. Silva, E. Rusu, C. Guedes Soares, "Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the Portuguese nearshore", *Energies*, vol. 6, no. 3, pp. 1344–1364, 2013.